



การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่พิจารณาพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุด้วยวิธีทางระบบเวลาไม่ต่อเนื่องสำหรับวงจรปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้ารวม

นิพนธ์ กัมแก้ว และ พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7428 7245 อีเมล: phonsit.s@psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.06.006

รับเมื่อ 16 กันยายน 2563 แก้ไขเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2563 ตอรับเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 11 มิถุนายน 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ไม่เหมาะสมกับระบบควบคุมดิจิทัลส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการชดเชยของวงจรปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้ารวม (วงจร UPQC) จากผลกระทบบ้างกล่าว บทความนี้นำเสนอกลยุทธ์ควบคุมร่วมกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีควบคุมมุมกำลัง โดยมุ่งเน้นการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่องสำหรับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง นอกจากนี้ บทความนี้ได้อธิบายหลักการทำงานของวงจร UPQC หลักการของวิธีควบคุมมุมกำลัง การไหลกำลังไฟฟ้าของวงจร UPQC และขั้นตอนการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไออย่างละเอียด ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ดี นอกจากนี้ วงจร UPQC สามารถฉีดแรงดันชดเชย และกระแสชดเชยให้กับระบบสามเฟสสามสายได้อย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันและโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ: วงจรปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้ารวม วิธีควบคุมมุมกำลัง การออกแบบตัวควบคุมพีไอบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

การอ้างอิงบทความ: นิพนธ์ กัมแก้ว และ พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, “การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่พิจารณาพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุด้วยวิธีทางระบบเวลาไม่ต่อเนื่องสำหรับวงจรปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้ารวม,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, หน้า 38-53, ม.ค.-มี.ค. 2565.



The PI Controller Design Based on Stored Energy in Capacitor Using Discrete Time Method for the Unified Power Quality Conditioner

Nippit Kimkaew and Phonsit Santiprapan*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7428 7245, E-mail: phonsit.s@psu.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.06.006

Received 16 September 2020; Revised 10 November 2020; Accepted 25 November 2020; Published online: 11 June 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Unsuitable controller parameters in the digital control system degrade the performance of the Unified Power Quality Conditioner (UPQC). From this effect, this article proposes the control strategy operated with the harmonic identification by using the power angle control method. This study focuses on design of the PI controller parameters by discrete time method for the DC bus voltage control. In addition, this article thoroughly describes the operation of the UPQC, the principle of power angle control, the power flow of the UPQC, and the procedure of the PI controller parameters design. The simulation results by the MATLAB/Simulink confirm that the PI controller designed by discrete time approach provides the good performance of DC bus voltage control. The UPQC can continuously inject the compensating voltage and the compensating current into the three-phase system even though the voltage source and loads are changed.

Keywords: Unified Power Quality Conditioner (UPQC), Power Angle Control (PAC), PI Controller Designed by Discrete Time Method

Please cite this article as: N. Kimkaew and P. Santiprapan, "The PI controller design based on stored energy in capacitor using discrete time method for the unified power quality conditioner," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, pp. 38–53, Jan.–Mar. 2022 (in Thai).



1. บทนำ

การใช้งานโหลดทางไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อรองรับกับแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า การใช้งานโหลดที่หลากหลาย (โหลดเชิงเส้น โหลดไม่เป็นเชิงเส้น) ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ฮาร์มอนิก แรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะ แรงดันไม่สมดุล กระแสไม่สมดุล ปัญหาดังกล่าวส่งผลเสียต่อระบบไฟฟ้า เช่น ความเชื่อถือได้ของระบบ (Reliability in Power Distribution Systems) การตรวจวัดทางไฟฟ้าผิดพลาด อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด เกิดกำลังงานสูญเสียและความร้อนต่ออุปกรณ์ขณะใช้งาน ด้วยเหตุนี้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสมัยใหม่ (Modern Power Distribution System) จึงมีประเด็นให้ศึกษาและพัฒนา วิธีการหนึ่ง คือ การใช้งานวงจรปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้ารวม (Unified Power Quality Conditioner; UPQC) [1]

การพัฒนาสมรรถนะการทำงานของวงจร UPQC สามารถพิจารณาได้หลายส่วน เช่น โครงสร้าง วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ระบบควบคุมกระแสชดเชย ระบบควบคุมแรงดันชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง งานวิจัยนี้มุ่งเน้น 2 ส่วน ได้แก่ วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก และระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง งานวิจัยด้านการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกได้รับการนำเสนอในหลากหลายวิธีการอย่างต่อเนื่อง เช่น วิธีการบออ้างอิงซิงโครนัส [2] วิธีการถ่วงน้ำหนักที่พหุคูณหนึ่ง [3] และวิธีควบคุมมุมกำลัง [4] บทความนี้เลือกใช้วิธีควบคุมมุมกำลัง (Power Angle Control; PAC) วิธีการดังกล่าวมีจุดเด่น คือ สามารถออกแบบให้มีการแบ่งจ่ายการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟระหว่างวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter; Shunt APF) และอนุกรม (Series Active Power Filter; Series APF) ซึ่งส่งผลให้พิกัดกำลังและราคาของวงจร UPQC ลดลง ส่วนที่ 2 คือ ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง เมื่อระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนแปลงทางด้านโหลด แรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะ เหตุการณ์ดังกล่าวส่งผลให้แรงดันบัลไฟตรงทางด้านวงจร UPQC ไม่สามารถคงค่าตามจุดการทำงานที่เหมาะสม ผลกระทบนี้

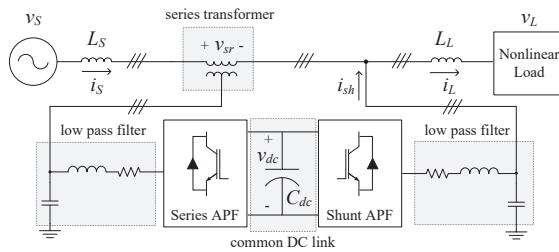
ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของวงจร UPQC ด้วยเหตุนี้ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงจึงมีบทบาทสำคัญสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะของวงจร UPQC ผลการบริทัศน์วรรณกรรมพบว่า ตัวควบคุมพีไอ (Proportional Integral Controller; PI controller) ถูกพิจารณาใช้งาน [5], [6] อย่างไรก็ตามการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมยังคงพิจารณาบนระบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous Time Approach) ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานเชิงปฏิบัติ เนื่องจากกลยุทธ์ควบคุมวงจร UPQC ในทางปฏิบัติจะดำเนินการบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยเหตุนี้ บทความนี้จะได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่องเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานทางด้านการปฏิบัติ นอกจากนี้ระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันชดเชยสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้กลยุทธ์ควบคุมโดยทางอ้อม (Indirect Control) ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation; PWM) เนื่องจากแนวทางควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ออกแบบง่าย การประมวลผลผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ลดลง และยังคงให้สมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ดีเมื่อทำงานร่วมกับอัลกอริทึม PAC

สาระสำคัญของบทความนี้ได้ถูกนำเสนอไว้ดังนี้ หัวข้อที่ 2.1 อธิบายโครงสร้างของวงจร UPQC 2.2 หลักการทำงานของวงจรและการทำงานของกำลังไฟฟ้า 2.3 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีควบคุมมุมกำลัง 2.4 วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก 2.5 กลยุทธ์ควบคุมสำหรับวงจร UPQC การจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการศึกษากับโปรแกรม MATLAB/Simulink ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3 ผลการทดลองและการอภิปรายหัวข้อที่ 4 สรุป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 โครงสร้างของวงจร UPQC

วงจร UPQC คือ วงจร APF ประเภทหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างวงจร Shunt APF และ Series APF โครงสร้างของวงจรดังกล่าวแสดงได้ ดังรูปที่ 1 บทความนี้พิจารณาปัญหา 2 ประเด็น ประเด็นแรก คือ เมื่อเกิดปัญหา



รูปที่ 1 โครงสร้างวงจร UPQC

ทางด้านกระแสที่โหลด (i_L) วงจร Shunt APF จะทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายกระแส เพื่อปรับแก้กระแสทางด้านแหล่งจ่าย (i_s) ได้แก่ กระแสฮาร์มอนิก รวมถึงปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ประเด็นที่สอง คือ เมื่อเกิดปัญหาทางด้านแรงดันที่แหล่งจ่าย (v_s) วงจร Series APF จะทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน เพื่อปรับแก้แรงดันทางด้านโหลด (v_L) ได้แก่ แรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะ

2.2 หลักการทำงานและการไหลของกำลังไฟฟ้า

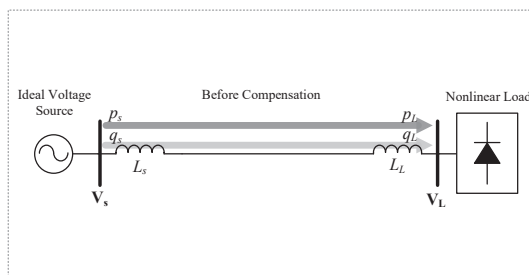
วงจร UPQC ทำหน้าที่ ป้อนกระแสชดเชย (i_{sh}) และแรงดันชดเชย (v_{sr}) บริเวณจุดต่อร่วมระหว่างการไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้า

(Point of Common Coupling; PCC) เพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบ ลักษณะการชดเชยดังกล่าวสามารถอธิบายได้ ดังสมการที่ (1) โดยที่ i_s^* คือ กระแสทางด้านแหล่งจ่ายอ้างอิง (ปกติ) และ v_L^* คือ แรงดันทางด้านโหลดอ้างอิง (ปกติ) ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาเมื่อใช้งานร่วมกับวงจร UPQC จะมีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ ดังรูปที่ 2

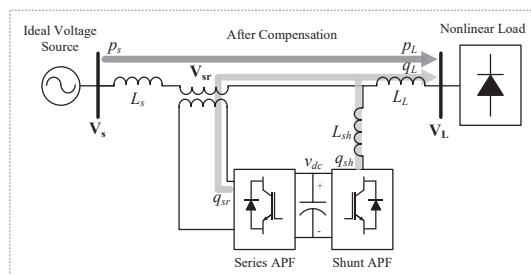
$$\left. \begin{aligned} i_{sh} &= i_s^* - i_L \\ v_{sr} &= v_L^* - v_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2.3 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีควบคุมมุมกำลัง

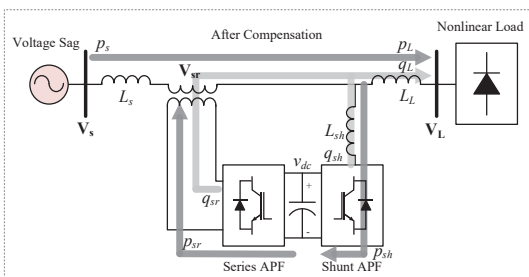
วิธี PAC ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณค่าทางไฟฟ้าอ้างอิงให้กับระบบควบคุมวงจร UPQC บทความนี้พิจารณาใช้แนวทางควบคุมกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (Apparent Power Approach; UPQC-S) [7] เฟสเซอร์การทำงานของอัลกอริทึม PAC แสดงได้ ดังรูปที่ 3 ถึง 5 เบื้องต้นตั้งสมมติฐานให้เป็นระบบสามเฟสสมดุล ไม่พิจารณากำลังสูญเสียของสายส่ง โหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง และยังไม่พิจารณาผลของฮาร์มอนิก หลักการของ PAC สามารถแบ่งการอธิบายออกเป็น 3 กรณี ดังนี้



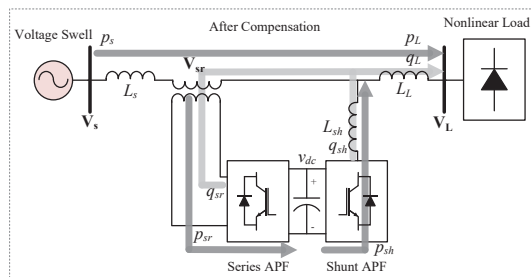
(ก) ก่อนการชดเชย



(ข) ภายหลังการชดเชยกรณีแหล่งจ่ายปกติ



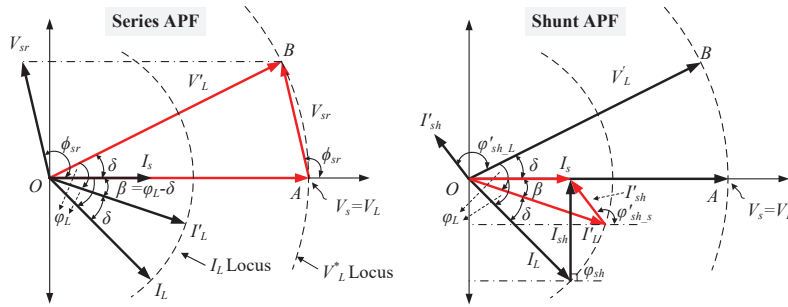
(ค) ภายหลังการชดเชยกรณีแหล่งจ่ายแรงดันตกชั่วขณะ



(ง) ภายหลังการชดเชยกรณีแหล่งจ่ายแรงดันเกินชั่วขณะ

รูปที่ 2 การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยวงจร UPQC

นิพนธ์ กัมแกว และ พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, “การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่พิจารณาลังงานสะสมในตัวเก็บประจุด้วยวิธีทางระบบเวลาไม่ต่อเนื่องสำหรับวงจรปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้ารวม.”



รูปที่ 3 เฟสเซอร์การทำงานของอัลกอริทึม PAC สำหรับวงจร UPQC กรณีแหล่งจ่ายแรงดันปกติ

กรณีที่ 1 พิจารณาเฟสเซอร์จากรูปที่ 3 พบว่าในช่วงก่อนการชดเชย แรงดันทางด้านแหล่งจ่าย (V_s) และแรงดันทางด้านโหลด (V_L) ยังคงมีขนาดและมุมเท่ากัน เมื่อวงจร Series APF จ่ายแรงดันชดเชย (V_{sr}) ให้กับระบบในกรณีแหล่งจ่ายแรงดันปกติ จะยังคงทำให้ขนาดแรงดัน V_L คงเดิม แต่ส่งผลให้ V_L มีการเปลี่ยนแปลงเป็น V'_L (เกิดขึ้นเมื่อออกแบบให้วงจร Series APF แบ่งภาระการชดเชย q ในระบบจากวงจร Shunt APF) ผลดังกล่าวทำให้เกิดมุมเฟสระหว่าง V_s กับ V_L เท่ากับ δ ซึ่งเรียกว่า มุมกำลัง (Power Angle) ค่ามุม δ สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ขึ้นอยู่กับค่ากำลังไฟฟ้านำเข้าด้วยเหตุนี้ ทำให้กระแสโหลด (I_L) เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น I'_L ด้วยขนาดมุม δ เพื่อรักษาผลต่างของมุมเฟสระหว่าง V_L กับ I_L ให้คงที่ และทำให้มุมเฟสระหว่าง V_s กับ I'_L มีค่าเท่ากับ β จากหลักการดังกล่าว ทำให้วงจร Shunt APF มีแนวโน้มจ่าย q_{sh} เพื่อชดเชยให้กับระบบลดลง ค่าขนาด และมุมเฟสของแรงดันชดเชยด้วยวงจร Series APF (v_{sr} , ϕ_{sr}) และค่าขนาด และมุมเฟสของกระแสชดเชยด้วยวงจร Shunt APF (i_{sh} , ϕ_{sh_L}) สามารถคำนวณได้จากเฟสเซอร์ ตามรูปที่ 3 ซึ่งแสดงได้ ดังสมการที่ (2) ถึง (5) ตามลำดับ โดยที่ k คือ ขนาดแรงดันอ้างอิง (rms)

$$V_{sr} = k \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \cos \delta} \quad (2)$$

$$\phi_{sr} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\sin \delta / (1 - \cos \delta) \right) \quad (3)$$

$$I'_{sh} = I'_L \cdot \sqrt{1 + \cos^2 \phi_L - 2 \cdot \cos \beta \cdot \cos \phi_L} \quad (4)$$

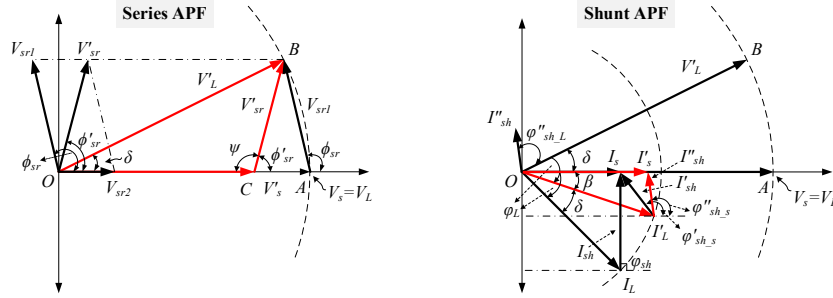
$$\phi'_{sh_L} = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \beta - \cos \phi_L}{\sin \beta} \right) + 90^\circ - \delta \quad (5)$$

ทั้งนี้ การคำนวณค่ามุม δ เพื่อกำหนดสัดส่วนการแบ่งภาระการชดเชย q ในระบบระหว่างวงจร Series APF กับวงจร Shunt APF เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา ด้วยเหตุนี้ ค่ากำลังไฟฟ้านำเข้าที่สูงสุดของวงจร Shunt APF ($Q_{sh,max}$) จึงถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ กล่าวคือ หาก q_L น้อยกว่าค่า $Q_{sh,max}$ วงจร Shunt APF จะทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้านำเข้าที่ไฟเพียงวงจรเดียว หาก q_L มากกว่าค่า $Q_{sh,max}$ วงจร Series APF จะช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้านำเข้าที่ส่วนที่เกินจากวงจร Shunt APF ดังนั้น ค่า δ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) โดยที่ Q_{sr} เท่ากับ $Q_{L,max} - Q_{sh,max}$ และ $Q_{L,max}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้านำเข้าที่สูงสุดของวงจร UPQC ที่สามารถจ่ายให้ระบบได้ การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้านำเข้าที่สูงสุดของวงจร Shunt APF ($Q_{sh,max}$) มีรายละเอียด ดังสมการที่ (7) โดยที่ $Q_{sr,max}$ คือ Q_{sr} มีค่ามากที่สุด เมื่อมุม δ มีค่ามากที่สุด V_{sr} กำหนดให้เท่ากับ $K_{sr}k$ และ K_{sr} คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกชั่วขณะ (Maximum Percentage of Voltage Sag) ที่ต้องชดเชย

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{Q_{sr}}{P_s} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{I_s \cdot k \cdot \sin \delta}{P_s} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q_{sh,max} &= Q_{L,max} - Q_{sr,max} \\ &= Q_{L,max} - (I_s k \sin \delta_{max}) \\ &= Q_{L,max} - \left(I_s k \sin \cos^{-1} \left(1 - \frac{K_{sr}^2}{2} \right) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

กรณีที่ 2 พิจารณาเฟสเซอร์จากรูปที่ 4 พบว่า เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ นอกจากวงจร Series APF และวงจร Shunt APF จะจ่าย q_{sr} และ q_{sh} ให้กับระบบคงเดิม วงจร



รูปที่ 4 เฟสเซอร์การทำงานของอัลกอริทึม PAC สำหรับวงจร UPQC กรณีแหล่งจ่ายแรงดันตกชั่วขณะ

Series APF ยังต้องป้อนแรงดันชดเชย (V_{sr}') เพิ่มเติม เพื่อควบคุมขนาด V_L' ให้คงที่ตามค่าอ้างอิง กำหนดให้ V_{sr1} แทนการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบในสภาวะแรงดันปกติ V_{sr2} แทนการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ ดังนั้น V_{sr}' สามารถคำนวณได้จากผลรวมของ V_{sr1} กับ V_{sr2} ดังสมการที่ (8)

$$\begin{aligned} V_{sr}' \angle \phi_{sr}' &= V_{sr1} \angle \phi_{sr} + V_{sr2} \angle 0^\circ \\ &= (V_L' \angle \delta - V_s \angle 0^\circ) + (V_L^* \angle 0^\circ - V_s' \angle 0^\circ) \end{aligned} \quad (8)$$

ในกรณีแรงดันตกชั่วขณะ ค่าขนาด และมุมเฟสของแรงดันชดเชยด้วยวงจร Series APF (V_{sr}', ϕ_{sr}') สามารถคำนวณได้จากเฟสเซอร์ตามรูปที่ 4 ซึ่งแสดงได้ ดังสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} V_{sr}' &= \sqrt{(k^2 + (n_o k)^2 - 2n_o k^2 \cos \delta)} \\ &= k \sqrt{1 + n_o^2 - 2n_o \cos \delta} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \phi_{sr}' &= 180^\circ - \psi \\ &= 180^\circ - \cos^{-1} \left(\frac{n_o^2 k^2 + V_{sr}'^2 - k^2}{2n_o k V_{sr}'} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

โดยที่

k คือ ค่าที่กำหนดให้แรงดันทางด้านโหลดก่อนและหลังชดเชยมีขนาดเท่ากับค่าอ้างอิง ($V_s = V_L = V_L^* = V_L'$)

V_s' คือ ค่าระดับแรงดันด้านแหล่งจ่ายที่ลดลงจากกรณีแรงดันตกชั่วขณะในระบบ

$$\begin{aligned} k_f &\text{ คือ ค่าความผันผวนของแรงดัน } (k_f = \frac{V_s - V_L^*}{V_s - V_L'}) \\ n_o &\text{ คือ ค่าสัดส่วนแรงดัน } (n_o = 1 + k_f = \frac{V_s'}{V_L^*}) \end{aligned}$$

ในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ แหล่งจ่ายต้องจ่ายกระแส (I_s) เพิ่มขึ้น เพื่อรักษาค่า p_s ให้เท่ากับ ความต้องการของ p_L ทางด้านโหลดตลอดเวลา ค่า I_s ที่เพิ่มจากเดิมถูกกำหนดเป็น I_s' ความสัมพันธ์ระหว่าง p_s และ p_L สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (11) จากสมการดังกล่าว ทำให้หาผลเฉลยของ I_s' ได้ ดังสมการที่ (12) ดังนั้น ค่าขนาดและมุมเฟสของกระแสชดเชยด้วยวงจร Shunt APF (I_{sh}', ϕ_{sh_L}') สามารถคำนวณได้จากเฟสเซอร์ตามรูปที่ 4 ซึ่งแสดงได้ ดังสมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

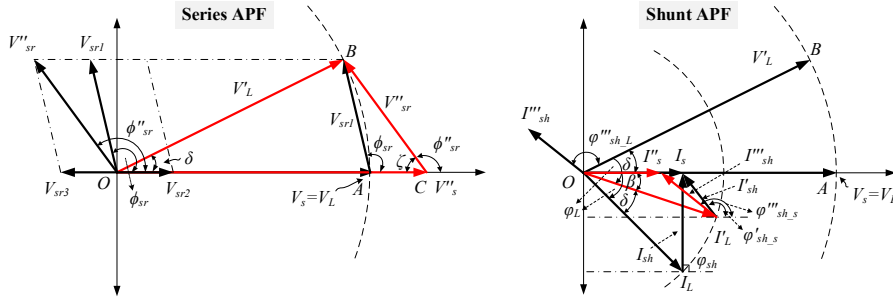
$$\begin{aligned} V_s' I_s' &= V_L I_L \cos \phi_L \\ &= V_L' I_L' \cos \phi_L \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I_s' &= \frac{I_L}{(1 + k_f)} \cos \phi_L \\ &= k_o I_L \cos \phi_L ; k_o = \frac{1}{1 + k_f} \end{aligned} \quad (12)$$

$$I_{sh}' = I_L' \sqrt{1 + k_o^2 \cos^2 \phi_L - 2k_o \cos \phi_L \cos \beta} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \phi_{sh_L}' &= \phi_{sh_S}' - \delta \\ &= \cos^{-1} \left(\frac{k_o^2 I_L'^2 \cos^2 \phi_L + I_{sh}'^2 - I_L'^2}{2I_{sh}' k_o I_L' \cos \phi_L} \right) - \delta \end{aligned} \quad (14)$$

กรณีที่ 3 พิจารณาเฟสเซอร์จากรูปที่ 5 พบว่า การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟยังคงเดิม เมื่อเกิดแรงดันเกิน



รูปที่ 5 เฟสเซอร์การทำงานของอัลกอริทึม PAC สำหรับวงจร UPQC กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเกินชั่วขณะ

ชั่วขณะเป็น V_s'' วงจร Series APF จะป้อนแรงดันชดเชย (V_{sr}'') เพื่อรักษาขนาดและมุมต่างเฟสระหว่าง V_s'' กับ V_L' ให้คงเดิมตามสภาวะโหลดที่พิจารณา โดยที่ V_{sr3} แทนการชดเชยแรงดันเกินชั่วขณะ ดังนั้น V_{sr}'' สามารถคำนวณได้จากผลรวมของ V_{sr1} กับ V_{sr3} ดังสมการที่ (15)

$$\begin{aligned} V_{sr}'' \angle \varphi_{sr}'' &= V_{sr1} \angle \varphi_{sr} + V_{sr3} \angle 180^\circ \\ &= V_{sr1} \angle \varphi_{sr} + (V_L' \angle 0^\circ + V_s'' \angle 180^\circ) \end{aligned} \quad (15)$$

ในกรณีแรงดันเกินชั่วขณะ ค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันชดเชยด้วยวงจร Series APF (V_{sr}'' , φ_{sr}'') สามารถคำนวณได้จากเฟสเซอร์ ตามรูปที่ 5 ซึ่งแสดงได้ ดังสมการที่ (16) และ (17) ตามลำดับ

$$V_{sr}'' = k \sqrt{1 + n_o^2 - 2n_o \cos \delta} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{sr}'' &= 180^\circ - \zeta \\ &= 180^\circ - \cos^{-1} \left(\frac{(n_o^2 k^2 + V_{sr1}'^2 - k^2)}{2n_o k V_{sr1}'} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

ในสภาวะแรงดันเกินชั่วขณะ แหล่งจ่ายต้องจ่าย I_s ลดลง เพื่อรักษา p_s ให้เท่ากับ ค่าความต้องการของ p_L ทางด้านโหลด ค่า I_s ที่ลดลงจากเดิมถูกกำหนดเป็น I_s'' ความสัมพันธ์ระหว่าง p_s และ p_L ยังคงอธิบายได้เช่นเดิม ซึ่งแสดงได้ ดังสมการที่ (18) จากสมการดังกล่าว ทำให้หาผลเฉลยของ I_s'' ได้ ดังสมการที่ (19) ดังนั้น ค่าขนาดและมุมเฟสของกระแสชดเชยด้วยวงจร Shunt APF (I_{sh}'' , φ_{sh-L}'')

สามารถคำนวณได้จากเฟสเซอร์ตามรูปที่ 5 ซึ่งแสดงได้ ดังสมการที่ (20) และ (21) ตามลำดับ จากกรณีที่ 2 และ 3 สังเกตได้ว่า การคำนวณค่าขนาดและมุมเฟสของสัญญาณชดเชยสำหรับวงจร Series APF และ Shunt APF ในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะ มีรูปสมการที่ใช้คำนวณเหมือนกัน แต่แตกต่างกันด้วยค่า k_f ที่เป็นตัวกำหนดผลลัพธ์ หากพิจารณาค่า k_f พบว่า ค่าดังกล่าวจะมีค่าเป็นลบในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ และมีค่าเป็นบวกในสภาวะแรงดันเกินชั่วขณะ ด้วยเหตุนี้ การคำนวณค่าขนาดและมุมเฟสของสัญญาณชดเชยสำหรับวงจร Series APF และ Shunt APF จึงสามารถเลือกใช้สมการในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะหรือแรงดันเกินชั่วขณะแทนกันได้

$$V_s'' I_s'' = V_L I_L \cos \varphi_L = V_L' I_L' \cos \varphi_L \quad (18)$$

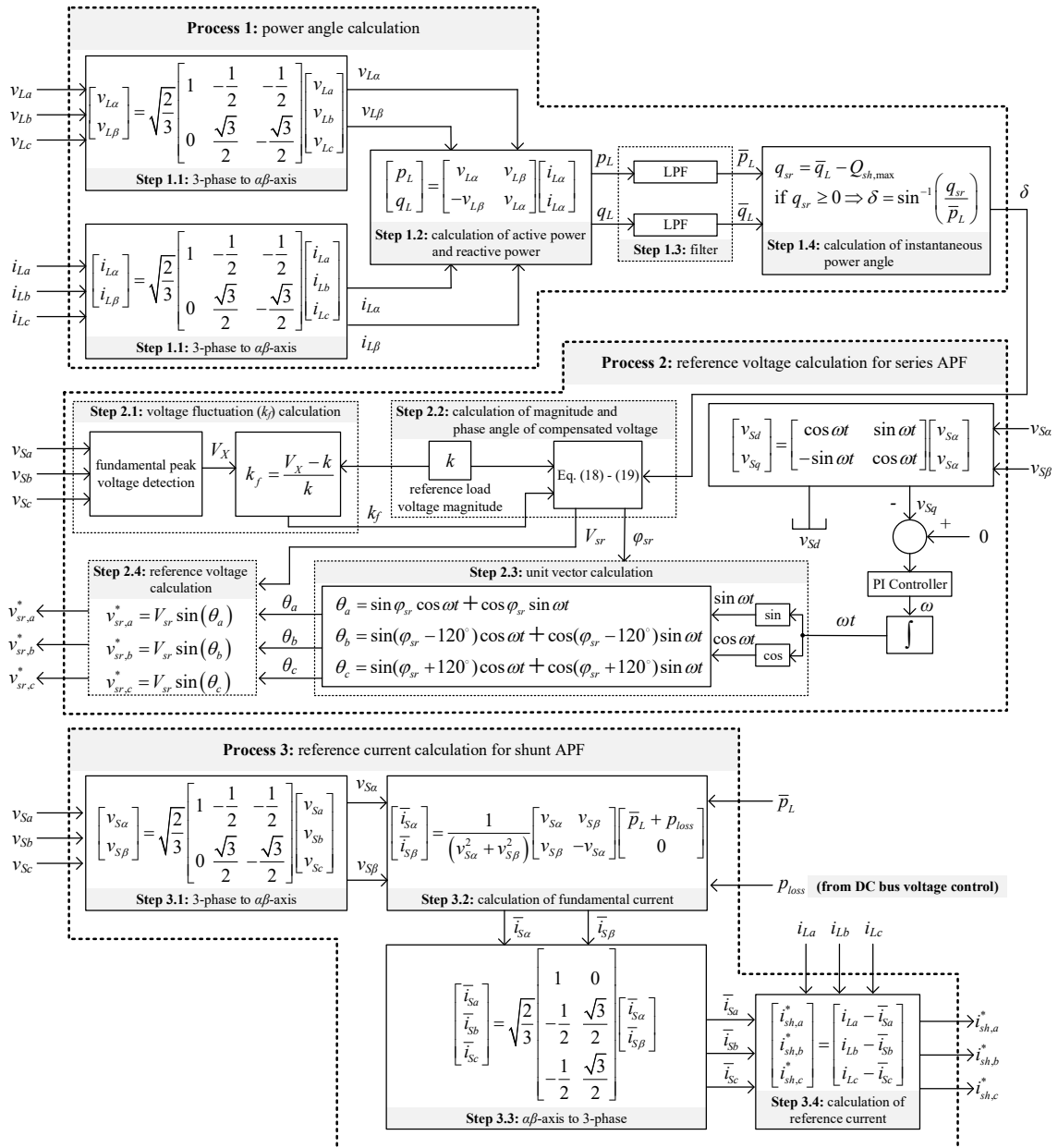
$$I_s'' = k_o I_L \cos \varphi_L \quad ; \quad k_o = 1 / (1 + k_f) \quad (19)$$

$$I_{sh}'' = I_L' \sqrt{1 + k_o^2 \cos^2 \varphi_L - 2k_o \cos \varphi_L \cos \beta} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{sh-L}'' &= \varphi_{sh-S}'' - \delta \\ &= \cos^{-1} \left(\frac{k_o^2 I_L'^2 \cos^2 \varphi_L + I_{sh}''^2 - I_L'^2}{2I_{sh}'' k_o I_L' \cos \varphi_L} \right) - \delta \end{aligned} \quad (21)$$

2.4 วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

การคำนวณขนาดและมุมเฟสของแรงดันชดเชย และกระแสชดเชยสำหรับวงจร UPQC คือ วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก จากหลักการในหัวข้อที่ 2.3 พบว่า การคำนวณค่า



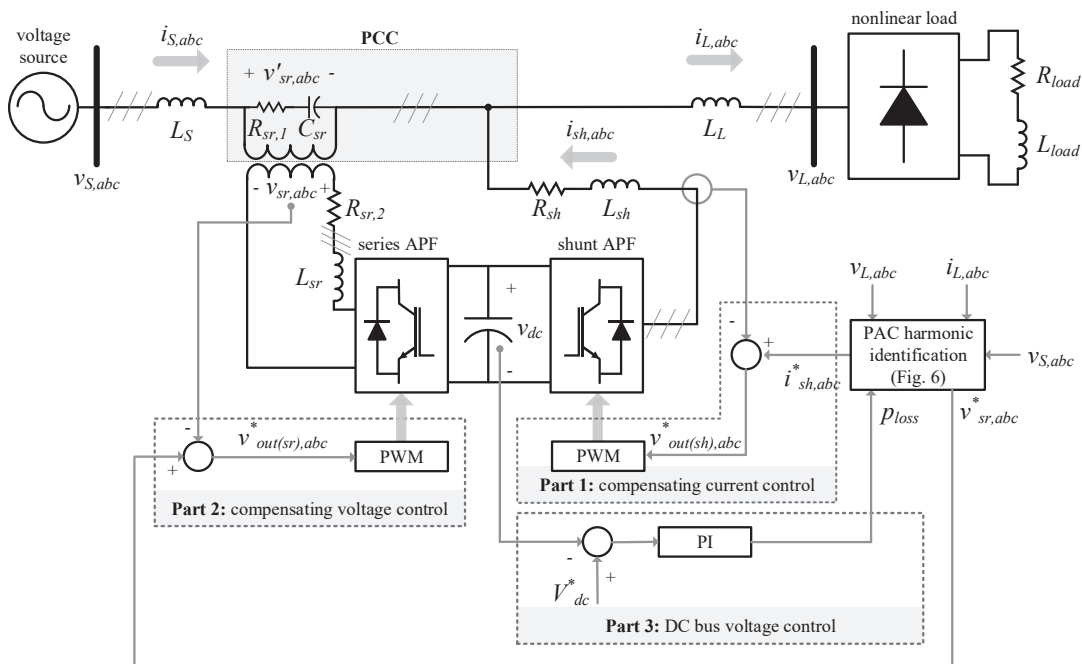
รูปที่ 6 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PAC สำหรับวงจร UPQC

ทางไฟฟ้าอ้างอิง สามารถแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการคำนวณค่า δ กระบวนการคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงสำหรับวงจร Series APF ($v_{sr,abc}^*$) และกระบวนการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับวงจร Shunt APF ($i_{sh,abc}^*$) แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PAC

สำหรับวงจร UPQC แสดงได้ดังรูปที่ 6 ค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นค่าทางไฟฟ้าอ้างอิงให้กับระบบควบคุมวงจร UPQC ต่อไป

2.5 กลยุทธ์ควบคุมสำหรับวงจร UPQC

กลยุทธ์ควบคุมสำหรับวงจร UPQC ดังรูปที่ 7 ถูกแบ่งออก



รูปที่ 7 แผนภาพบล็อกกลยุทธควบคุมสำหรับวงจร UPQC

เป็น 3 ระบบควบคุม ได้แก่ ระบบควบคุมแรงดันชดเชย ระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งแต่ละส่วนอธิบายได้ ดังนี้

2.5.1 ระบบควบคุมแรงดันชดเชยสำหรับวงจร Series APF และระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจร Shunt APF

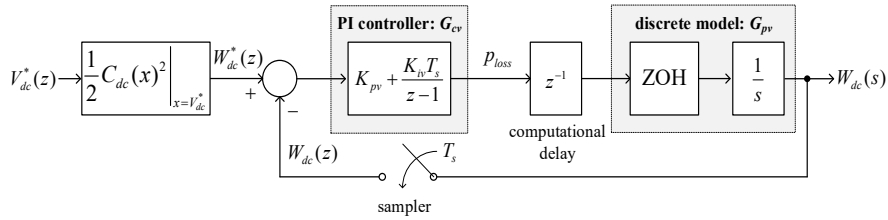
ค่า $i_{sh,abc}^*$ และ $v_{sr,abc}^*$ จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PAC ถูกนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับค่ากระแสชดเชยของวงจร Shunt APF ($i_{sh,abc}$) และค่าแรงดันชดเชยของวงจร Series APF ($v_{sr,abc}$) ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงสำหรับวงจร Shunt APF ($v_{out(sh),abc}^*$) และแรงดันอ้างอิงสำหรับวงจร Series APF ($v_{out(sr),abc}^*$) บทความนี้เลือกใช้วิธีฮิสเทอรีซิส [8] และวิธี PWM [9] สำหรับสร้างสัญญาณการสวิตช์ให้กับวงจร Shunt APF และวงจร Series APF ตามลำดับ

2.5.2 ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

ระบบดังกล่าวถูกนำมาใช้งานเพื่อควบคุมให้ v_{dc} มีค่าคงที่ตามค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) บทความนี้มุ่งเน้นการออกแบบระบบควบคุม v_{dc} ที่คำนึงถึงพลังงานสะสมใน

ตัวเก็บประจุ (Stored Energy in Capacitor; W_{dc}) เนื่องด้วยแนวทางดังกล่าวไม่พึ่งพาเทคนิคการประมาณ ส่งผลให้ลดความซับซ้อนสำหรับการออกแบบและวิเคราะห์ ตัวควบคุมพีไอถูกพิจารณาใช้ในระบบนี้ เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลตอบสนองในสภาวะคงตัวที่ดี ซึ่งเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในทางปฏิบัติ กลยุทธ์ควบคุมสำหรับวงจร UPQC จะถูกนำไปใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยเหตุนี้ วิธีการออกแบบดิจิทัลโดยตรง (Direct Digital Design) [10] จึงถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม โดยมีขั้นตอนการออกแบบ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_{nv}) ค่าอัตราส่วนการหน่วง (ζ) และค่าเวลาการซีกตัวอย่าง (Sampling Time; T_s) ค่า ω_{nv} ควรกำหนดให้มีค่าต่ำกว่าลู่วควบคุมกระแสชดเชยอย่างน้อย 10 เท่า เนื่องจากวงจร Shunt APF ถูกออกแบบให้ชดเชยกระแสฮาร์มอนิกสูงสุดที่ 50 อันดับ (2500 เฮิรตซ์ หรือ 15708 เรเดียนต่อวินาที) ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดให้ ω_{nv} เท่ากับ 62.83 เรเดียนต่อวินาที (10 เฮิรตซ์)



รูปที่ 8 แผนภาพบล็อกกระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

ผลตอบสนองของ v_{dc} ควรมีการพุ่งเกินและการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เหมาะสม ดังนั้นผู้ออกแบบกำหนดให้ค่า ζ เท่ากับ 0.707 เพื่อให้ระบบตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (Under-damped Response) และกำหนดให้ค่า T_s เท่ากับ $10 \mu s$ ซึ่งพิจารณาจากระยะเวลาในหนึ่งรอบการคำนวณของระบบควบคุมทั้งหมด (One Computational Time)

ขั้นตอนที่ 2 หาแบบจำลองของระบบ ($G_{pv}(z)$) โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (22) ฟังก์ชัน $G_{pv}(s)$ สามารถเขียนอธิบายให้อยู่ในโดเมนซีได้ ดังสมการที่ (23) ซึ่งผลเฉลยจากสมการดังกล่าวมีการพิจารณาร่วมกับฟังก์ชันการคงค่าอันดับศูนย์ (Zero Order Hold; ZOH)

$$W_{dc} = \int p_{loss} dt \Rightarrow G_{pv}(s) = \frac{W_{dc}(s)}{P_{loss}(s)} = \frac{1}{s} \quad (22)$$

$$G_{pv}(z) = (1 - z^{-1}) \cdot Z \left\{ \frac{G_{pv}(s)}{s} \right\} = \frac{T_s}{z-1} \quad (23)$$

ขั้นตอนที่ 3 หาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอ ($G_c(z)$) ซึ่งจะได้ผลเฉลย ดังสมการที่ (24)

$$G_{cv}(z) = \frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s} \Bigg|_{s=\frac{z-1}{T_s}} \quad (24)$$

$$G_{cv}(z) = K_{pv} \left(\frac{z-\alpha}{z-1} \right) ; \alpha = 1 - \frac{K_{iv}T_s}{K_{pv}}$$

ขั้นตอนที่ 4 หาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมวงปิด ($T(z)$) ซึ่งจะได้ผลเฉลยดังสมการที่ (25)

$$T(z) = \frac{W_{dc}(z)}{W_{dc}^*(z)} \Bigg|_{s=\frac{z-1}{T_s}} = \frac{\eta_v(z-\alpha)}{z^3 - 2z^2 + (\eta_v + 1)z - \eta_v\alpha} ; \eta_v = K_{iv}T_s \quad (25)$$

ระบบควบคุม v_{dc} ที่พิจารณาพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุสามารถอธิบายด้วยแผนภาพบล็อกกระบบควบคุมในโดเมนซี ดังรูปที่ 8 โดยที่ W_{dc}^* คือ ค่าพลังงานสะสมอ้างอิงในตัวเก็บประจุ ($W_{dc}^* = 0.5C_{dc}(V_{dc}^*)^2$) และ W_{dc} คือ ค่าพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ ($W_{dc} = 0.5C_{dc}(V_{dc})^2$)

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าโพลเด่นบนระนาบซีดังสมการที่ (26)

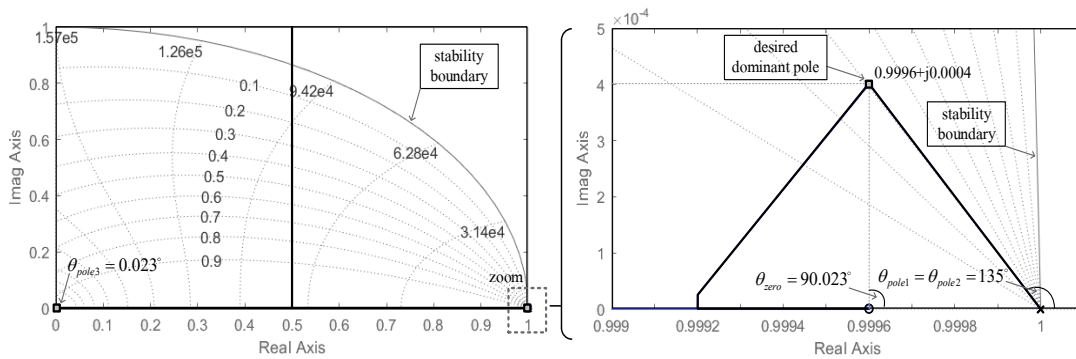
$$z = e^{T_s(-\zeta\omega_{nv} \pm j\omega_{nv}\sqrt{1-\zeta^2})} = 0.9996 \pm j0.0004 \quad (26)$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่า K_{pv} และ α โดยฟังก์ชันแผนภาพเส้นทางเดินรากบนระนาบซี ดังรูปที่ 9 ผลเฉลยจากขั้นตอนนี้แสดงได้ ดังสมการที่ (27)

$$G_{cv}(z) = 79.895 + \frac{3195.8T_s}{z-1} \quad (27)$$

3. ผลการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์ของระบบระบุไว้ ดังตารางที่ 1 การจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ระบบต่อกับโหลดเชิงเส้น และกรณีที่ 2 ระบบต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยกำหนดให้ค่ากำลังรีแอกทีฟสูงสุดที่วงจร Shunt APF จ่ายชดเชยให้กับระบบ เท่ากับ 1000 วาร์ การจำลองสถานการณ์ทั้ง 2 กรณี จะแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ช่วงที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.5 วินาที กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ โดยที่วงจร UPQC จะเริ่มทำงานตั้งแต่เวลา 0.1 วินาที เป็นต้นไป ช่วงที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.5 ถึง 1.0 วินาที กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกชั่วขณะ 20% [11] ช่วงที่ 3 ตั้งแต่เวลา 1.0 ถึง 1.5 วินาที กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ



รูปที่ 9 แผนภาพเส้นทางเดินรากบนระนาบซี้ของระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

และช่วงสุดท้าย ตั้งแต่เวลา 1.5 ถึง 2.0 วินาที กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเกินชั่วขณะ 20% [11]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบ

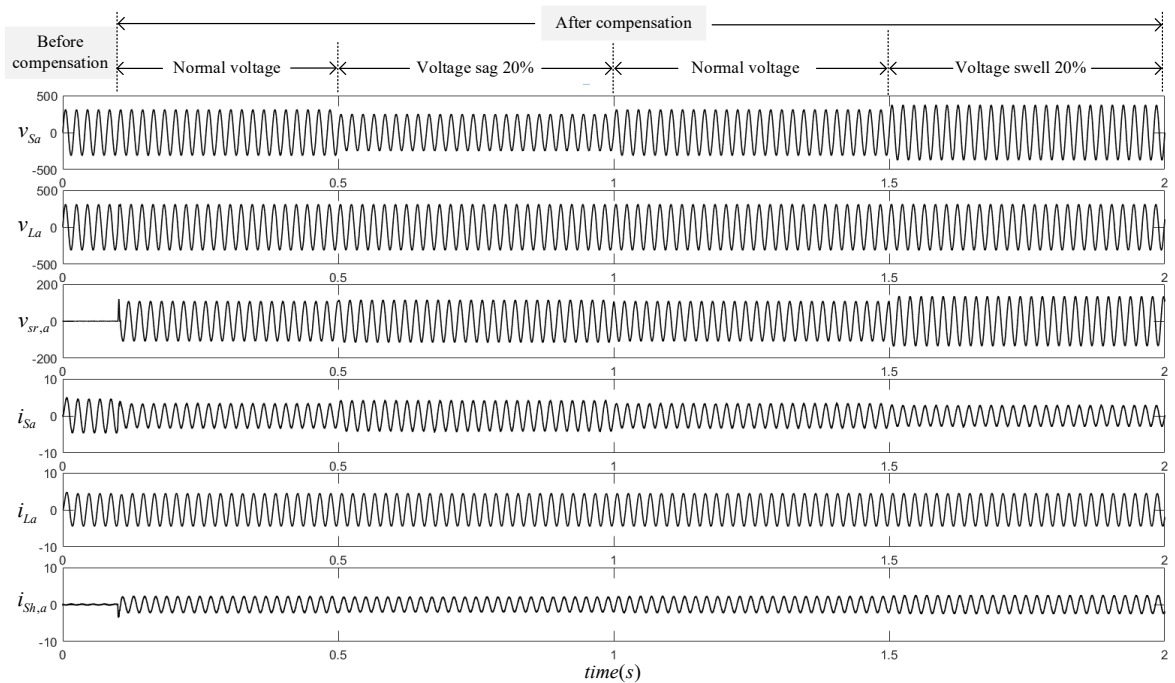
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	$V_s = 220 \text{ Vrms}$, $f_s = 50 \text{ Hz}$, $L_s = 5.1 \text{ mH}$
โหลดเชิงเส้น	$S_{3p} = 1500 \text{ W} + j1500 \text{ Var}$
โหลดไม่เป็นเชิงเส้น	$R_s = 80 \Omega$, $L_s = 0.5 \text{ H}$
วงจร Shunt APF	$R_{sh} = 0.2 \Omega$, $L_{sh} = 36 \text{ mH}$, $V_{dc}^* = 750 \text{ V}$, $C_{dc} = 1000 \mu\text{F}$, $HB = 0.005$
วงจร Series APF	$R_{sr,2} = 0.2 \Omega$, $L_{sr} = 30 \text{ mH}$, $f_{sw} = 10 \text{ kHz}$
หม้อแปลงอนุกรม	$S_{sr} = 7.5 \text{ kVA}$, $220/220 \text{ V}$
วงจรกรองผ่านสูง	$R_{sr,1} = 1 \Omega$, $C_{sr} = 100 \mu\text{F}$

3.1 กรณีระบบต่อกับโหลดเชิงเส้น

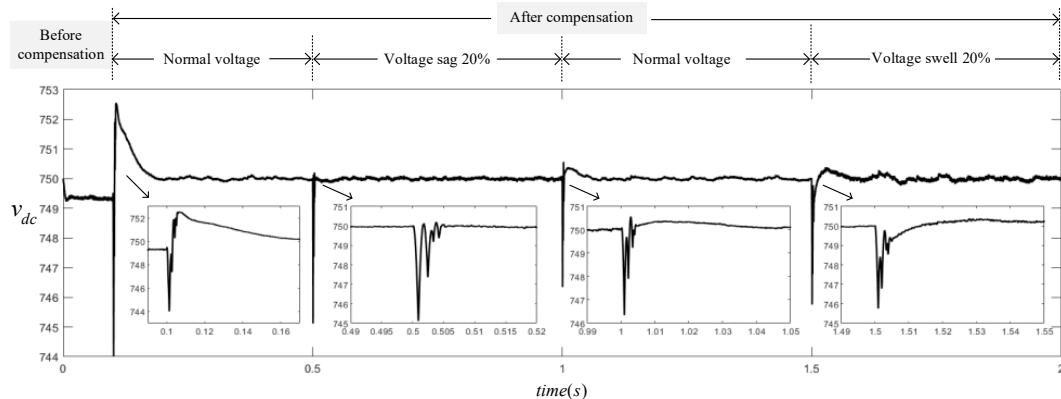
จากรูปที่ 10 (ก) สังเกตได้ว่า ช่วงเวลา 0 ถึง 0.1 วินาที เป็นช่วงก่อนการชดเชย วงจร UPQC ยังไม่มีการฉีดแรงดันชดเชยกับกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ ทำให้รูปสัญญาณ i_s เหมือนกับรูปสัญญาณ i_L วงจร UPQC จะเริ่มทำงานตั้งแต่เวลา 0.1 วินาที โดยโหลดเชิงเส้นที่ต่อกับแหล่งจ่าย มีขนาดเท่ากับ 1500 วัตต์ และ 1500 วาร์ ซึ่งมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงกว่าพิกัดกำลังของวงจร Shunt APF จากหลักการของวิธี PAC ที่นำเสนอในข้อที่ 2 ทำให้วงจร Series APF ต้องจ่าย v_{sr} ที่ค่าแรงดันสูงสุดประมาณ 110 โวลต์ ด้วยมุม ϕ_{sr} เท่ากับ 100 องศา เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่วนที่เหลือ ทำให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่าง v_s กับ v_L ประมาณ 20 องศา วงจร Shunt APF จ่าย i_{sh} ที่กระแสสูงสุดประมาณ 2.3 แอมแปร์ ในช่วง

เวลา 0.1 ถึง 0.5 วินาที ดังนั้น ระบบมีแรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ วงจร Series APF จึงทำหน้าที่จ่ายชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบเพียงอย่างเดียว ต่อมาช่วงเวลา 0.5 ถึง 1 วินาที กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกชั่วขณะ 20% ช่วงเวลาดังกล่าว วงจร Series APF ต้องทำหน้าที่ควบคุมค่า v_L ซึ่งเพิ่มเติมจากการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบในส่วนที่เกินพิกัดกำลังของวงจร Shunt APF ดังนั้น วงจร Series APF จึงต้องจ่าย v_{sr} เพิ่มขึ้น เพื่อควบคุมค่า v_L ให้คงที่ตามค่าอ้างอิง ขนาดแรงดันสูงสุดที่ชดเชย มีค่าประมาณ 116 โวลต์ ด้วยมุม ϕ_{sr} เท่ากับ 67.5 องศา ในขณะที่วงจร Shunt APF ยังคงทำหน้าที่เหมือนเดิม ช่วงเวลา 1 ถึง 1.5 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ วงจร Shunt APF และ Series APF ทำหน้าที่เหมือนกับช่วงเวลา 0.1 ถึง 0.5 วินาที และช่วงสุดท้าย ตั้งแต่เวลา 1.5 ถึง 2 วินาที กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเกินชั่วขณะ 20% วงจร Series APF จึงต้องจ่าย v_{sr} เพิ่มขึ้น เพื่อควบคุมให้ค่า v_L คงที่ตามค่าอ้างอิง ขนาดแรงดันสูงสุดที่ชดเชย มีค่าประมาณ 136 โวลต์ ด้วยมุม ϕ_{sr} เท่ากับ 127 องศา โดยตลอดช่วงการทำงาน มุมต่างเฟสระหว่าง v_s กับ v_L จะมีค่าประมาณ 20 องศา ยกเว้นช่วงเวลา ตั้งแต่ 0.0 ถึง 0.1 วินาที มุมต่างเฟสระหว่าง v_s กับ v_L จะมีเท่ากับ 0 องศา เนื่องจากโหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 10 (ข) สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบสามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรงได้ เท่ากับ 750 โวลต์ ทั้งในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ กรณีแรงดันตกชั่วขณะ 20% และกรณีแรงดันเกินชั่วขณะ 20%



(ก) กระแสและแรงดันกรณีเฟส a

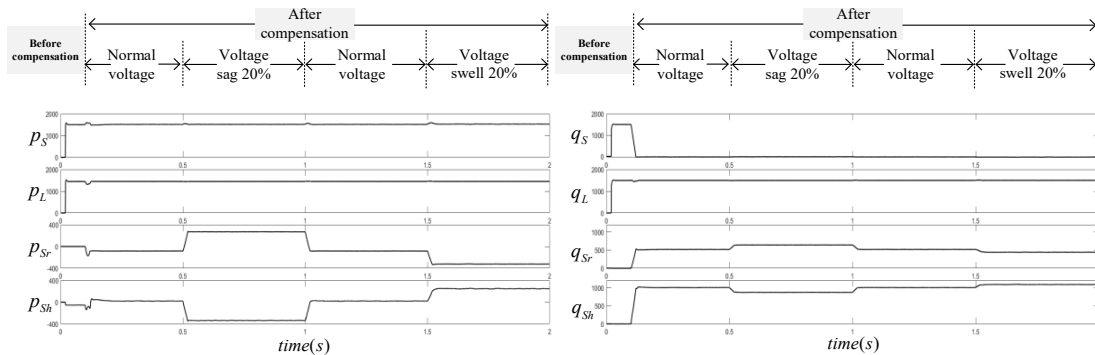


(ข) แรงดันบัสไฟตรงของวงจร UPQC

รูปที่ 10 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยวงจร UPQC กรณีระบบต่อกับโหลดเชิงเส้น

จากรูปที่ 11 สังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชย p_{sr} และ p_{sh} มีค่าเท่ากับ 0 วัตต์ โดยที่ค่า p_s และ p_L มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อวงจร UPQC เริ่มฉีดกระแสชดเชยและแรงดันชดเชยเข้าไปในระบบ ตั้งแต่เวลา 0.1 วินาที จะพบว่า ช่วงเวลาตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ ค่า p_{sr} และ p_{sh} มีค่าประมาณ -86 และ 27 วัตต์ ตามลำดับ ช่วงเวลาตั้งแต่ 0.5

ถึง 1 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายตกชั่วขณะ 20% วงจร Series APF จะจ่าย p_{sr} ประมาณ 268 วัตต์ เพื่อรักษา v_L คงที่ตามค่าอ้างอิง ทำให้ v_{dc} ลดลง ดังนั้น วงจร Shunt APF จึงต้องรับ p_{sh} ประมาณ 330 วัตต์ เพื่อควบคุม v_{dc} ให้กลับมามีค่าตามค่าอ้างอิง ช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 1.5 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายกลับสู่สภาวะปกติ ค่า p_{sr} และ p_{sh} มีค่าเท่ากับช่วงแรก ถัดมา



รูปที่ 11 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟ กรณีระบบต่อกับโหลดเชิงเส้น

ช่วงสุดท้าย เวลาตั้งแต่เวลา 1.5 ถึง 2 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายเกินชั่วขณะ 20% วงจร Series APF จะรับ p_{sr} ประมาณ 324 วัตต์ เพื่อรักษา v_L คงที่ตามค่าอ้างอิง ทำให้ v_{dc} เพิ่มขึ้น ดังนั้น วงจร Shunt APF จึงต้องจ่าย p_{sh} ประมาณ 253 วัตต์ เพื่อควบคุม v_{dc} ให้กลับมาตามค่าอ้างอิง โดยตลอดช่วงเวลา ที่ v_s เกิดการเปลี่ยนแปลง p_s และ p_L จะมีค่าคงที่

3.2 กรณีระบบต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ผลการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยวงจร UPQC กรณีระบบต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 12 จากรูป 12 (ก) สังเกตได้ว่า ช่วงเวลา 0 ถึง 0.1 วินาที เป็นช่วงก่อนการชดเชย ทำให้รูปสัญญาณ i_s เหมือนกับรูปสัญญาณ i_L ซึ่งมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์ ค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 25.06% วงจร UPQC จะเริ่มทำงานตั้งแต่เวลา 0.1 วินาที โดยโหลดไม่เชิงเส้นที่ต่อกับแหล่งจ่าย มีขนาดเท่ากับ 3227 วัตต์ และ 602 วาร์ ซึ่งมีกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟต่ำกว่าพิกัดกำลังของวงจร Shunt APF ดังนั้น Series APF จึงไม่ต้องจ่าย v_{sr} ทำให้มุมต่างเฟสระหว่าง v_s กับ v_L ประมาณ 0 องศา โดยช่วงเวลา 0 ถึง 0.5 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ ดังนั้น ช่วงเวลา 0.1 ถึง 0.5 วินาที วงจร Shunt APF ทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับระบบเพียงวงจรเดียว หลังจากการชดเชย รูปสัญญาณ i_s มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น ค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 2.54% ต่อมาช่วงเวลา 0.5 ถึง 1 วินาที กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกชั่วขณะ 20% วงจร Series APF จึงต้องทำหน้าที่ควบคุม

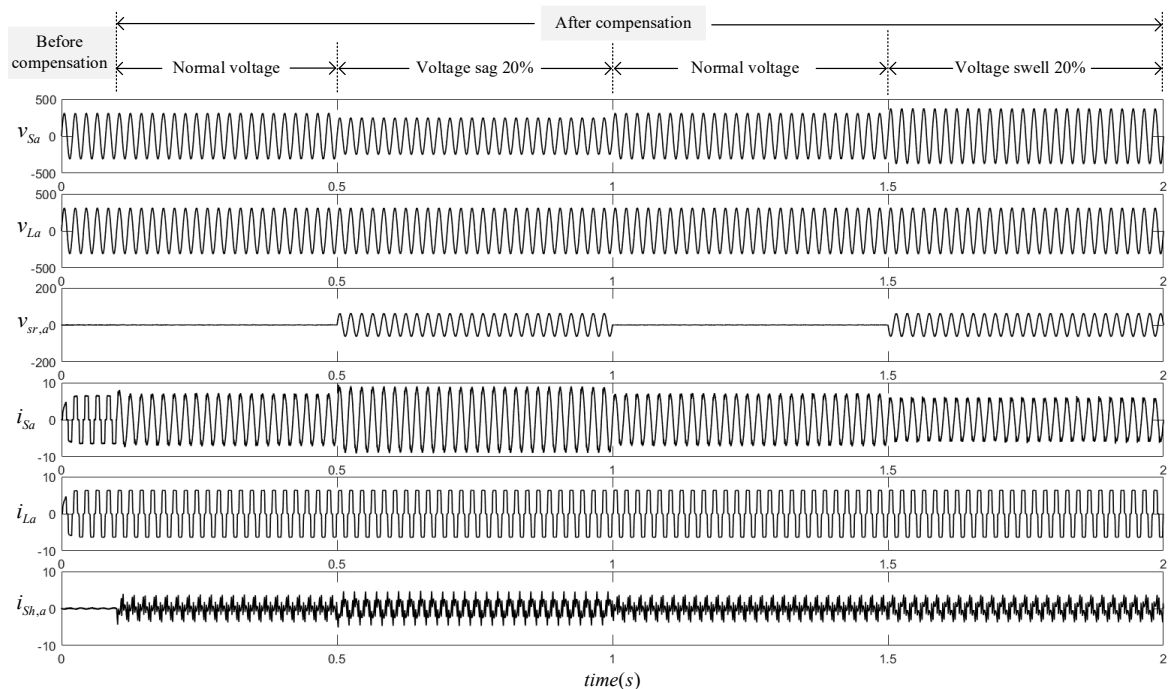
ค่า v_L คงที่ตามค่าอ้างอิงวงจร Series APF จึงต้องจ่าย v_{sr} ขนาดแรงดันสูงสุดที่ชดเชย มีค่าประมาณ 64 โวลต์ ขนาดมุม ϕ_{sr} เท่ากับ 0 องศา ในขณะที่วงจร Shunt APF ยังคงทำหน้าที่เหมือนเดิมหลังการชดเชย รูปสัญญาณ i_s ยังคงมีลักษณะเป็นรูปไซน์ ค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 2.04%

ช่วงเวลา 1 ถึง 1.5 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ Series APF จะหยุดจ่ายแรงดันชดเชยเหมือนกับช่วงเวลา 0.1 ถึง 0.5 วินาที และช่วงสุดท้าย ตั้งแต่เวลา 1.5 ถึง 2 วินาที กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเกินชั่วขณะ 20% วงจร Series APF จึงต้องจ่าย v_{sr} ขนาดแรงดันสูงสุดที่ชดเชย มีค่าประมาณ 64 โวลต์ ขนาดมุม ϕ_{sr} เท่ากับ 180 องศา เพื่อควบคุมค่า v_L คงที่ตามค่าอ้างอิง หลังจากการชดเชย รูปสัญญาณ i_s มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น

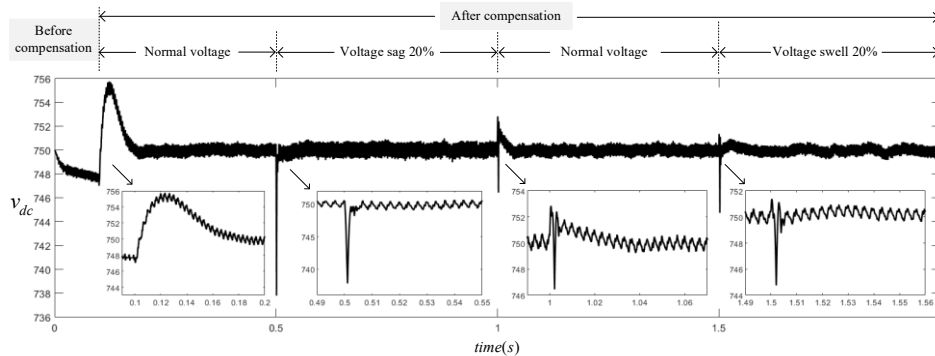
ค่า $\%THD_i$ หลังการชดเชย เท่ากับ 3.24% โดยตลอดช่วงเวลามุมต่างเฟสระหว่าง v_s กับ v_L จะมีค่าประมาณ 0 องศา เนื่องจากโหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 12 (ข) สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอยังคงสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ เท่ากับ 750 โวลต์ ถึงแม้ว่าแรงดันที่แหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 13 สังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชย p_{sr} และ p_{sh} มีค่าเท่ากับ 0 วัตต์ โดยที่ค่า p_s และ p_L มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 3,227 วัตต์ เมื่อวงจร UPQC เริ่มฉีดกระแสและแรงดันชดเชยเข้าไปในระบบ ตั้งแต่เวลา 0.1 วินาที จะพบว่า ช่วงเวลาตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายปกติ ค่า p_{sr} และ p_{sh} มีค่าประมาณ 0 และ -57 วัตต์ ตามลำดับ ช่วงเวลาตั้งแต่



(ก) กระแสและแรงดันกริดเฟส a

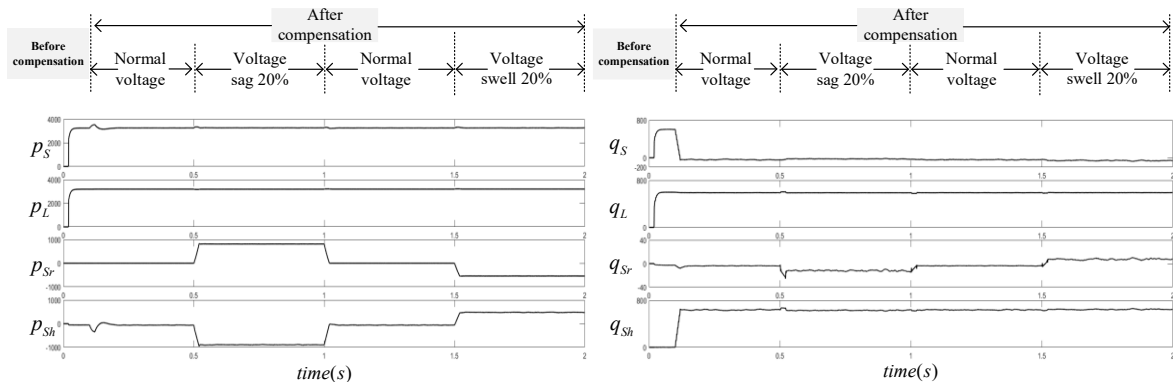


(ข) แรงดันบัลไฟตรงของวงจร UPQC

รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยวงจร UPQC กรณีระบบต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

0.5 ถึง 1 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายตกชั่วขณะ 20% วงจร Series APF จะจ่าย p_{sr} ประมาณ 812 วัตต์ เพื่อรักษา v_L คงที่ตามค่าอ้างอิง ทำให้ v_{dc} ลดลง ดังนั้นวงจร Shunt APF จึงต้องรับ p_{sh} ประมาณ 886 วัตต์ เพื่อควบคุม v_{dc} ให้กลับมามีค่าตามค่าอ้างอิง ช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 1.5 วินาที แรงดันที่แหล่งจ่ายกลับสู่สภาวะปกติ ค่า p_{sr} และ p_{sh} จะมีค่าเท่ากับช่วงแรก ถัดมาช่วงสุดท้าย เวลาตั้งแต่เวลา 1.5 ถึง 2 วินาที

แรงดันที่แหล่งจ่ายเกินชั่วขณะ 20% วงจร Series APF จะรับ p_{sr} ประมาณ 540 วัตต์ เพื่อรักษา v_L คงที่ตามค่าอ้างอิง ทำให้ v_{dc} เพิ่มขึ้น ดังนั้น วงจร Shunt APF จึงต้องจ่าย p_{sh} ประมาณ 480 วัตต์ เพื่อควบคุม v_{dc} ให้กลับมามีค่าตามค่าอ้างอิง โดยตลอดช่วงเวลาที่ v_s เกิดการเปลี่ยนแปลง p_s และ p_L จะมีค่าคงที่ตลอดเวลา จากรูปที่ 13 ยังสังเกตได้ว่า ช่วงก่อนชดเชยแหล่งจ่ายจะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ



รูปที่ 13 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟ กรณีระบบต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 2 ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนและหลังชดเชย

กรณี	ส่วนที่พิจารณา	กำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA)			
		ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย		
			แรงดันปกติ	แรงดันตกชั่วขณะ 20%	แรงดันเกินชั่วขณะ 20%
โหลดเชิงเส้น	แหล่งจ่าย	1500+j1500	1509-j16	1510-j12	1522-j21
	โหลด	1449+j1500	1450+j1497	1448+j1495	1451+j1499
	วงจร Series APF	0	-86+j516	268+j640	-324+j439
	วงจร Shunt APF	0	27+j998	-330+j868	253+j1082
โหลดไม่เป็นเชิงเส้น	แหล่งจ่าย	3227+j602	3252-j12	3264-j5	3258-j19
	โหลด	3227+j597	3195+j590	3191+j588	3198+j590
	วงจร Series APF	0	-j4	812-j8	-541
	วงจร Shunt APF	0	-57+j607	-886+j604	482+j610

ให้กับโหลด ประมาณ 600 วาร์ หลังการชดเชย วงจร Shunt APF จะจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟให้กับโหลดแทนแหล่งจ่ายเพียงวงจรเดียว เนื่องจากกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของโหลดไม่เกินพิกัดกำลังของวงจร Shunt APF โดยวงจร Shunt APF จะจ่ายประมาณ 610 วาร์ ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนและหลังชดเชยของวงจร UQC แสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2 และ 3

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจร UQC ระบบควบคุมดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้งานร่วมกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PAC ผลการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 3 ดัชนีวัดสมรรถนะสำหรับวงจร UQC กรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ค่าชี้วัดสมรรถนะ	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย		
		แรงดันปกติ	แรงดันตกชั่วขณะ 20%	แรงดันเกินชั่วขณะ 20%
%THD _{IGV}	25.06	2.54	2.03	3.24

ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สามารถยืนยันได้ว่า วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่นำเสนอ สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ตามค่าอ้างอิง วิธีการออกแบบที่นำเสนอเหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ วงจร UQC สามารถชดเชยแรงดันทางด้านโหลดกรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายตกชั่วขณะและเกินชั่วขณะ รวมถึงยังคงสามารถ

ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในกรณีใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้ ค่า %THD, หลังการชดเชยอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE Std. 519-2014

อย่างไรก็ตาม ปัญหาทางด้านแรงดันฮาร์มอนิก กระแสไม่สมดุล ปัญหาค่าตัวประกอบกำลังที่เกิดจากโหลดแบบเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitive Load) รวมถึงการแปรเปลี่ยนความถี่ของระบบไฟฟ้า เป็นข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะได้ดำเนินการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อปรับแก้ปัญหาดังกล่าวต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ โดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) รหัสสัญญา MRG6280022

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Khadkikar, "Enhancing electric power quality using UPQC: A comprehensive overview," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 5, pp. 2284–2297, 2012.
- [2] M. Kesler and E. Ozdemir, "Synchronous-reference-frame-based control method for UPQC under unbalanced and distorted load conditioners," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 3967–3975, 2011.
- [3] M. Aredes, K. Heumann, and E. H. Watanabe, "An universal active power line conditioner," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 545–551, 1988.
- [4] V. Khadkikar and A. Chandra, "A new control philosophy for a unified power quality conditioner (UPQC) to coordinate load reactive power demand between shunt and series inverter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2522–2534, 2008.
- [5] R. J. Millniz, J. Carlo, and M. Mezaroba, "Asimplified control technique for a dual unified power quality conditioner," *IEEE Transaction on Industrial Electronic*, vol. 61, no. 11, pp. 5851–5860, 2014.
- [6] Z. Dongjiao and T. Zhii, "A new method to design the dc voltage controller for the UPQC," presented at the 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, China, 16–18 June 2010.
- [7] V. Khadkikar, "UPQC-S: A novel concept of simultaneous voltage sag/swell and load reactive power compensations utilizing series Inverter UPQC," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 9, pp. 2414–2425, 2011.
- [8] R. K. Patjoshi and K. Mahapatra, "High-performance unified power quality conditioner using non-linear sliding mode and new switching dynamics control strategy," *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 8, pp. 863–874, 2017.
- [9] G. Wang and W. Li, "Parabolic PWM for current control of voltage-source converters (VSCs)," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3491–3496, 2010.
- [10] C. L. Phillips and R. D. Harbor, *Feedback Control Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs: NJ, 1988.
- [11] Electricity Generating Authority of Thailand. (2019). *Requirements on the operation of the power grid system of the Electricity Generating Authority of Thailand*. [Online]. Available: <https://www.egat.co.th/images/information/trans/gridcode/egat-gridcode-operation.pdf>